

Прочность на продавливание при статическом и динамическом нагружениях

В.В. Крылов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Принятые эмпирические предпосылки расчета железобетонных плит на продавливание, основанные на многочисленных экспериментальных данных, не учитывают особенности напряженно-деформированного состояния сопряжения перекрытия с колонной при разрушении по схеме продавливания. Это связано с отсутствием расчетных моделей, в которых бы рассматривались комплексно все действующие внутренние усилия, обеспечивающие сопротивление сопряжения продавливанию. Сложность задачи связана с тем, что сечения узлового сопряжения находятся в неодноосном напряженном состоянии. Напряженно-деформированное состояние плит на продавливание при динамической нагрузке в настоящий момент мало изучено. В настоящей статье предлагается методика определения несущей способности симметричного узлового сопряжения колонны с перекрытием на продавливание при статическом и кратковременном динамическом нагружении. Предлагаемая расчетная модель прочности на продавливание основана на следующих предпосылках: сопротивление продавливанию монолитного армированного перекрытия складывается из сопротивления сдвигу по поверхности приведенной пирамиды продавливания, формируемой высотой сжатой зоны бетона; прочность бетона сопротивления сдвигу увеличивается за счет объемных сжимающих усилий по поверхности приведенной пирамиды продавливания; угол наклона граней пирамиды продавливания зависит от скорости нагружения. Полученные теоретические зависимости применимы при статическом и динамическом нагружении и удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сопряжение монолитного перекрытия с колонной, статическая и динамическая нагрузка, пирамида продавливания, касательные напряжения, прочность бетона при срезе, прочность на продавливание.

Введение

В современной технической литературе уделяется достаточно много внимания оценке прочности монолитных плит при продавливании [1-3]. Это обусловлено актуальностью проблемы, связанной в первую очередь с интенсивным развитием монолитного многоэтажного домостроения [4, 5]. Толщина перекрытий, которые являются наиболее материалоемкими несущими элементами здания, во многом определяется критерием прочности на продавливание. Вторым фактором, определяющим важность этой

проблемы, являются несовершенства действующей методики оценки несущей способности при продавливании.

Схема разрушения от продавливания, по контуру пирамиды была предложена А.А. Гвоздевым на основе многочисленных опытных данных и долгое время не подвергалась совершенствованию. В настоящее время при наличии многообразия конструктивных решений сопряжений монолитных перекрытий с вертикальными несущими элементами различных конфигураций, упрощенный подход схемы разрушения по пирамиде либо призме продавливания не обеспечивает надежных результатов по несущей способности [6]. Теоретические методики оценки прочности на продавливание зарубежных нормативных документов основываются на эмпирических зависимостях [7], полученных на основе многочисленных экспериментальных исследованиях. Следует отметить, что они дают надежные результаты при соблюдении определенных конструктивных требований, что снижает их универсальность.

Необходимость более детального анализа напряженно-деформированного состояния при продавливании становится очевидной. Начинать следует с анализа комбинации внутренних усилий жесткого сопряжения плиты с колонной.

При отсутствии продольного армирования в растянутой зоне разрушение от продавливания произойдет по поверхности пирамиды. Этот случай в практике проектирования сопряжений колонн с перекрытием не встречается.

По линии сопряжения плиты с прямоугольной (квадратной) колонной действуют опорные изгибающие моменты в двух ортогональных направлениях. Величина этих моментов для наиболее распространенных пролетов велика и в упругой постановке превышает пролетные в два раза. Учитывая перераспределение усилий и наиболее вероятным образование

трещин в растянутой зоне, можно утверждать, что в эксплуатационной стадии опорные сечения плит имеют сжатую и растянутую зоны. Этот факт на стадии близкой к разрушению подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями [8-10] на симметричных образцах фрагментов сопряжения колонны с перекрытием при наличии в растянутой зоне плиты рабочей арматуры. При таком напряженно-деформированном состоянии в расчетной схеме при оценке прочности на продавливание следует исключить часть боковой поверхности «приведенной» пирамиды, ограниченной нейтральной осью по всем граням. Следовательно, в предельной по несущей способности стадии, сопротивление оказывает поверхность пирамиды, располагаемой в зоне, где действуют сжимающие напряжения. А это, основываясь на действующей методике расчета, приведет к существенному снижению несущей способности на продавливание. Однако, на практике этого не происходит, поскольку как показывают экспериментальные исследования [10] прочность при срезе в условиях обжатия до определенного уровня от R_b , повышается. Очевидно, что прочность при продавливании должна оцениваться с учетом объемного напряженного состояния.

Материалы и методы

Опираясь на расчетную схему, показанную на рис.1, которая была предложена в [10], сопротивление продавливанию оказывают усилия, равные проекции на вертикальную ось от касательных напряжений, распределенных по поверхности приведенной пирамиды продавливания на четырех гранях

$$N = Q_{bx1} + Q_{bx2} + Q_{by1} + Q_{by2} ,$$

где $Q_{bx_i(y_i)}$ – проекция на вертикальную ось усилия, воспринимаемого бетоном при продавливании по соответствующим граням X и Y.

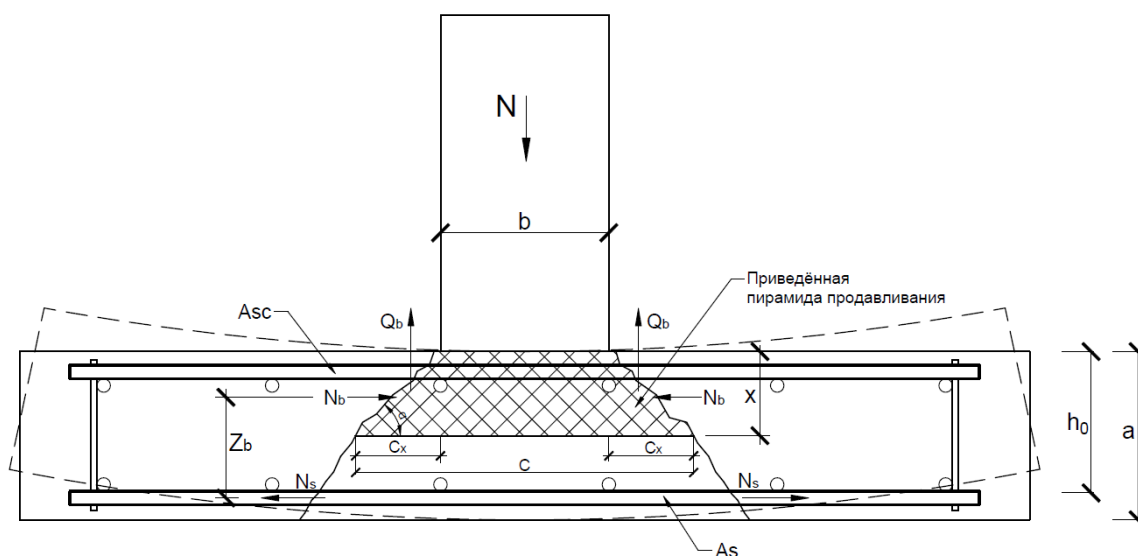


Рис. 1. – Расчетная схема к определению несущей способности узла сопряжения колонны с перекрытием при продавливании

Усилие, воспринимаемое бетоном по поверхности пирамиды продавливания при симметричном узловом сопряжении, равно:

$$Q_{bi} = k_1 \sigma_{sh} k_2 A_{redi} \sin \varphi, \quad (1)$$

где σ_{sh} – максимальные касательные напряжения по поверхности пирамиды продавливания [11];

k_1 – коэффициент полноты эпюры распределения касательных напряжений (при распределении напряжений по параболе $k_1 \cong 0,66$);

k_2 – коэффициент, учитывающий повышение прочности на срез при наличии бокового обжатия [7];

A_{red} и φ – площадь боковой поверхности приведенной пирамиды продавливания и угол наклона грани пирамиды к плоскости перекрытия.

Тогда усилие продавливания будет равно:

$$N = 4Q_{bi} \quad (2)$$

Максимальные касательные напряжения будут равны сопротивлению срезу, которое можно определить, исходя из известного выражения [4]:

$$R_{sh} = \sigma_{sh} = 0,75 \sqrt{R_b R_{bt}},$$

где R_b и R_{bt} - призмная прочность бетона и прочность бетона при растяжении.

В данной расчетной схеме основными неизвестными являются напряжения сжатия в бетоне, напряжения в растянутой арматуре и геометрические параметры приведенной пирамиды продавливания.

Площадь грани пирамиды продавливания можно выразить через высоту сжатой зоны x_i :

$$A_{red,i} = \frac{b + c_i}{2} * h_{red,i} = \left(b + \frac{x_i \cos \varphi}{\sin \varphi} \right) \frac{x_i}{\sin \varphi},$$

где b – ширина колонны;

c_i - проекция наклонной грани пирамиды (см. рис.1);

$h_{red,i}$ – высота пирамиды продавливания на i -ой грани:

$$h_{red,i} = \frac{x_i}{\sin \varphi}.$$

Результаты

Проведенные экспериментальные исследования [10] показали, что в предельной стадии:

- относительная высота сжатой зоны при статическом нагружении в предельной стадии соответствует $\xi=0,46$, а при динамическом нагружении в среднем $\xi=0,36$;

- уровень напряжений в бетоне сжатой зоны составил $0,62R_b$ при статическом и динамическом нагружениях;

- напряжения в растянутой арматуре при статическом нагружении достигали расчетного сопротивления R_s , при динамическом нагружении уровень напряжения составил $0,75 R_s$;

- коэффициенты k_2 увеличения прочности бетона на срез по экспериментальным данным и по рекомендациям [7] получились близкими;

- расхождения между значениями несущей способности по предложенной зависимости (1, 2) и экспериментальными данными не превышают 14%.

Предлагаемая методика оценки несущей способности узла сопряжения монолитного перекрытия с колонной при разрушении по схеме продавливания была использована для образцов известных авторов [1, 2, 11]. Результаты сопоставления теории с опытными данными представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Результаты расчета экспериментальных образцов известных авторов по предлагаемой методике

Автор	R_b , МПа	A_b , см ²	A_s , см ²	N_{exp} , кН	$K_{2 exp}$	$K_{2 theor}$	N_{theor} , кН	$\frac{N_{theor}}{N_{exp}}$, %
Пекин Д.А.	22	2460	11,3	1180	1,84	1,95	1253,1	6,2
Клованич С.Ф.	21,6	1167,3	9,04	776	2,19	2,34	830,75	7,1
Болгов А.Н.	33	380,3	3,14	254	1,71	1,86	276	8,7

Как видно из таблицы 1, сходимость экспериментальных и теоретических данных удовлетворительная.

Выводы

1. Результаты экспериментальных и численных исследований [10] на основе метода конечных элементов показали, что при центральном продавливании при наличии верхней и нижней арматуры в плите в предельной стадии по несущей способности сопротивление продавливанию оказывает приведенная поверхность пирамиды, имеющая высоту, равную высоте сжатой зоны бетона. При этом сопротивление срезу повышается за счет бокового обжатия.

2. Снижение несущей способности перекрытия на продавливание при времени нагружения от нуля до разрушения 3.22 мкс по сравнению со статическим приложением нагрузки в среднем составило 15%;
3. В предельной стадии при разрушении по схеме продавливания напряжения в растянутой арматуре и сжатом бетоне в пределах, очерченной гранью пирамиды, не достигают предельных. При выбранном проценте армирования напряжения растяжения в арматуре достигали: при динамическом нагружении - $0,7R_s$; при статическом нагружении – $0,9R_s$, максимальные напряжения сжатия в бетоне при статическом и динамическом нагружениях составили $0,65R_b$.
4. Увеличение сопротивления срезу за счет наличия бокового обжатия при соответствующих уровнях составило $R_{sh} = (1,28 - 1,72) \sqrt{R_b R_{bt}}$.

Литература

1. Болгов А.Н. О некоторых проблемах расчета монолитных безбалочных безкапитальных перекрытий // Вестник отделения строительных наук. 2004. № 8. С. 67-73.
 2. Клованич С.Ф., Шеховцов В.И. Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты. Одесса: ОНМУ, 2011. 121 с.
 3. Сухарева А.В., Аксенов В.Н. Техничко-экономическая оценка влияния конструктивного решения монолитных перекрытий при возведении многоэтажного здания с использованием кессонных плит // Инженерный вестник Дона, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5548
 4. Алмазов В.О. Проектирование железобетонных конструкций по Евронормам. Москва: АСВ, 2011. 216 с.
 5. Трекин Н.Н., Крылов В.В., Трофимов С.В., Евстафьева Е.Б., Саркисов Д.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 8. С. 1006-1014.
-

6. Маилян Д.Р., Дель Сокорро В.А.Л. Рациональные конструкции железобетонных плит каркасно-монолитных зданий в условиях Мексики // Инженерный вестник Дона, 2020, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6515

7. Петров А.Н. Экспериментальные исследования бетона при нагружении сжатием и срезом // Бетон и железобетон. 1965. №11. С. 34-37.

8. Yu J., Luo L.-Zh., Fang Q. Structure behavior of reinforced concrete beam-slab assemblies subjected to perimeter middle column removal scenari // Engineering Structures. 2020. V. 208. pp. 1-19.

9. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Testing robustness: A full-scale experimental test on a two-storey reinforced concrete frame with solid slabs // Engineering Structures. 2021. V. 240. pp. 1-17.

10. Крылов В.В., Саркисов Д.Ю., Эргешов Э.Т., Евстафьева Е.Б. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Конструкция опытных образцов // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. №3. С. 47-53.

11. Пекин Д.А. Применение скрытых металлических капителей в безбалочных монолитных перекрытиях // Современная наука и инновации. 2016. № 2. С. 110-115.

References

1. Bolgov A.N. Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk. 2004. № 8. pp. 67-73.
 2. Klovanich S.F., Shekhovtsov V.I. Prodvliivanie zhelezobetonnykh plit. Naturnyy i chislennyy eksperimenty [Pushing through reinforced concrete slabs. Full-scale and numerical experiments]. Odessa: ONMU, 2011. 121 p.
 3. Sukhareva A.V., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5548
-



4. Almazov V.O. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruktsiy po Evronormam [Design of reinforced concrete structures according to the European Standards]. Moskva: ASV, 2011. 216 p.
5. Trekin N.N., Krylov V.V., Trofimov S.V., Evstaf'eva E.B., Sarkisov D.Yu. Vestnik MGSU. 2021. V. 16. № 8. pp. 1006-1014.
6. Mailyan D.R., Del' Sokorro V.A.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6515
7. Petrov A.N. Beton i zhelezobeton. 1965. № 11. pp. 34-37.
8. Yu J., Luo L.-Zh., Fang Q. Engineering Structures. 2020. V. 208. pp. 1-19.
9. Caldentey A.P., Diego Y.G., Fernández F.A., Santos A.P. Engineering Structures. 2021. V. 240. pp. 1-17.
10. Krylov V.V., Sarkisov D.Yu., Ergeshov E.T., Evstaf'eva E.B. Stroitel'nye materialy i izdeliya. 2020. V. 3. № 3. pp. 47-53.
11. Pekin D.A. Sovremennaya nauka i innovatsii. 2016. № 2. pp. 110-115.

Дата поступления: 8.12.2023

Дата публикации: 17.01.2024